

Pemetaan Endapan Awan Panas Gunung Api Semeru Periode Juni 2021 - Desember 2021 menggunakan Citra Radar Sentinel 1 dan Optik Sentinel 2

Dyah Retno Budiarti¹, Theodosius Marwan Irnaka¹, Herlan Darmawan^{1,*}

¹Program Studi Geofisika, Departemen Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Gadjah Mada

*Email: herlan_darmawan@mail.ugm.ac.id

Submit: 26 November 2022 ; Revised: 11 Mei 2023; Accepted: 19 Agustus 2023

Abstrak: Gunung Semeru merupakan gunung api aktif di Kabupaten Lumajang dan Kabupaten Malang, Jawa Timur yang memiliki potensi bencana erupsi. Erupsi Gunung Api Semeru tanggal 4 Desember 2021 mengakibatkan awan panas dengan jarak luncur melebihi batas Kawasan Rawan Bencana (KRB) III tahun 1996. Pasca kejadian erupsi, satelit non-komersil (Sentinel-1) melintas dan mengambil gambar sebaran awan panas Gunung Semeru. Penelitian ini menggunakan dataset Sentinel-1 untuk memonitor perubahan morfologi dan memetakan zona endapan awan panas Semeru dari bulan Juni hingga Desember 2021. Data satelit Sentinel-1 yang digunakan untuk penelitian memanfaatkan informasi intensitas hamburan balik dari satelit radar Sentinel-1. Kemudian perbandingan dua data dengan waktu yang berbeda dilakukan untuk melihat perubahan morfologi Gunung Semeru. Hasil perbandingan kemudian didelineasi dan divalidasi dengan citra Sentinel-2 sehingga didapatkan peta zona bahaya awan panas Gunung Semeru. Hasil peta zona bahaya awan panas menggambarkan awan panas guguran sekitar 15,2 km dari puncak, dengan luas area terdampak mencapai 5,5 km². Area tersebut digunakan sebagai dasar koreksi peta zona KRB III tahun 1996 dan sudah sesuai dengan peta zona KRB III tahun 2021 yang ditetapkan oleh Badan Geologi Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral.

Kata kunci: Gunung Semeru, Sentinel-1, Sentinel-2, KRB, awan panas

Abstract: Semeru Volcano is an active volcano in Lumajang and Malang Regency, East Java which has the potential for eruption. The latest devastating eruption occurred on December 4, 2021, with minimum volcano earthquake precursors. The eruption produced a pyroclastic flows with a maximum distance outside the disaster-prone zone (KRB) III in 1996. After the eruption, non-commercial satellites (Sentinels) passed over Semeru Volcano and identified the distribution of pyroclastic flows. Therefore, in this research, Sentinel dataset were used to monitor morphological changes and to map pyroclastic flows deposit between June and December 2021. We used the information of backscattering amplitude of radar satellite Sentinel-1 which then were compared time series data to see changes of the morphology of Semeru Volcano. The result were then delineated and validated with Sentinel-2 imageries to obtain a pyroclastic hazard

map. The result of pyroclastic hazard map. The result of the pyroclastic hazard map has a maximum launch distance around of 15,2 km and an affected area up to 5,5 km². That area is used to correction KRB zone III in 1996 and is in accordance with KRB zone III in 2021 by "Badan Geologi Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral".

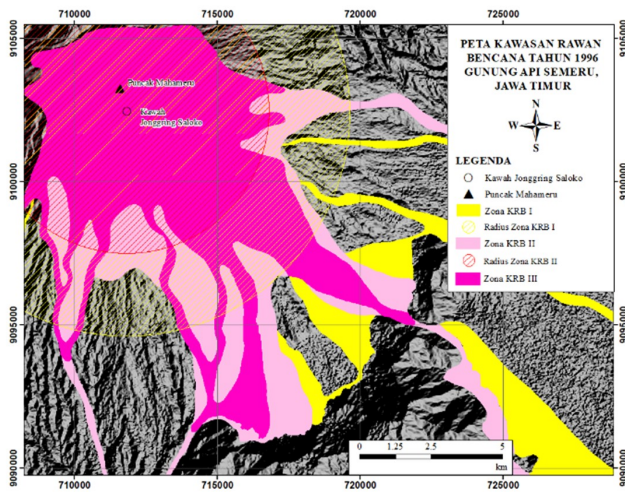
Keywords: Semeru Volcano, Sentinel-1, Sentinel-2, KRB, pyroclastic flow

1 PENDAHULUAN

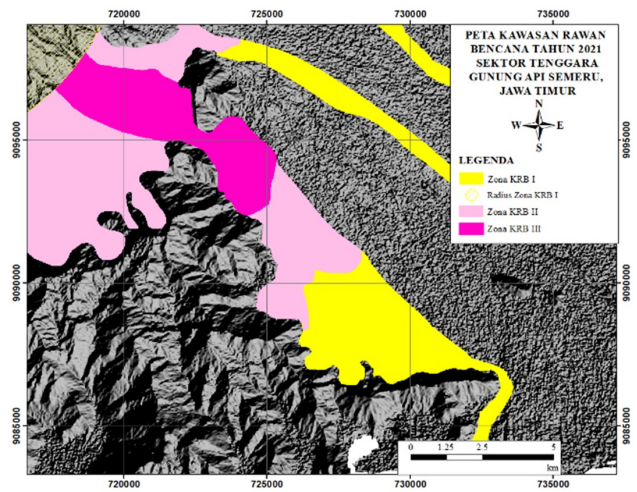
Indonesia memiliki banyak gunung api aktif yang diakibatkan karena pertemuan tiga lempeng berupa Lempeng Eurasia, Lempeng Indo-Australia, dan lempeng Pasifik. Salah satu gunung api aktif yang ada di Indonesia adalah Gunung Semeru yang secara geografis terletak pada 08° 6,5' LS dan 112° 55' BT antara Kabupaten Lumajang dan Kabupaten Malang, Jawa Timur. Lempeng Indo-Australia merupakan lempeng samudra bergerak dengan kecepatan 6-7 cm/tahun (DeMets dkk., 1990). Lempeng Indo-Australia bergerak ke utara menunjam Lempeng Eurasia (lempeng benua) karena relatif lebih tipis. Ketika Lempeng Indo-Australia (kaya H₂O) akan menurunkan suhu leleh batuan sehingga terjadi pelelehan sebagian. Pelelehan batuan menjadi material magma naik ke permukaan berinteraksi dengan kerak benua dan menyebabkan perubahan komposisi serta sifat magma (Handley dkk., 2007).

Sifat dan komposisi magma dapat mempengaruhi bentuk dan karakteristik gunung api. Gunung Semeru termasuk ke dalam tipe Gunung Api Strato dengan ketinggian 3676 mdpl dan memiliki karakter letusan bertipe Vulkanian dan Strombolian. Karakter letusan Gunung Semeru dapat diketahui dari catatan sejarah erupsinya. Letusan Gunung Semeru tercatat pertama kali tanggal 8 November 1818 (BadanGeologi, 2014). Pada tanggal 4 Desember 2021 terjadi erupsi awan panas guguran dengan area terdampak lebih luas dibandingkan zona Kawasan Rawan Bencana III tahun 1996 (Gambar 1) BadanGeologi (2021). Erupsi tersebut mengakibatkan 1071 bangunan rusak dan 66 korban jiwa di Desa Sumberwuluh dan Pronojiwo (BNPB, 2020).

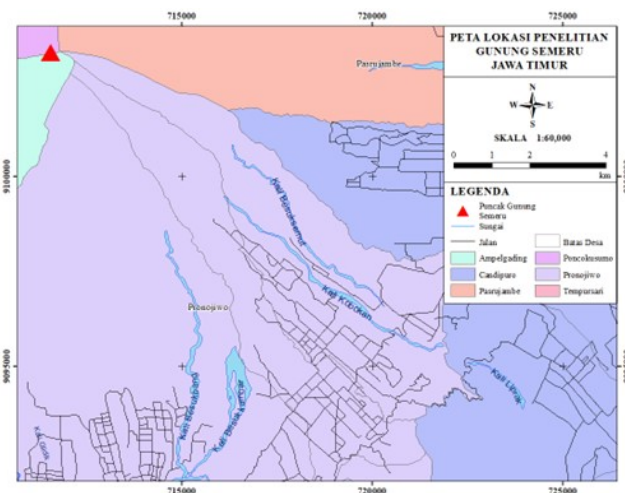
Pasca erupsi, Gunung Semeru terus mengalami peningkatan aktivitas dan statusnya naik menjadi level III siaga pada tanggal 16 Desember 2021 (BadanGeologi, 2021). Fo-



Gambar 1. Peta KRB 1996. Zona KRB I ditandai dengan warna kuning, zona KRB II ditandai dengan warna pink muda, zona KRB III ditandai dengan warna pink tua. (modifikasi dari Bron-to dkk., 1996)

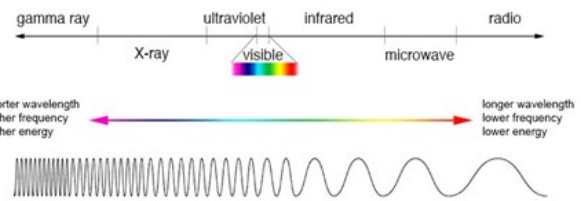


Gambar 3. Peta KRB 2021 sektor tenggara. Zona KRB I ditandai dengan warna kuning, zona KRB II ditandai dengan warna pink muda, zona KRB III ditandai dengan warna pink tua.



Gambar 2. Lokasi Penelitian

kus penelitian berada di sebelah tenggara puncak Gunung Semeru dengan memanfaatkan satelit radar untuk pemetaan cepat (Gambar 2). Tidak seperti satelit optik panjang gelombang satelit radar yang lebih besar (1mm – 1m) dapat menembus awan dan dapat menggambarkan perubahan morfologi puncak gunung api aktif pasca erupsi seperti erupsi Merapi 2014, flank collapse Anak Krakatau 2018, dan Colima 2013 (Darmawan dkk., 2018; Walter dkk., 2015, 2019). Penelitian ini menggunakan satelit radar Sentinel-1 yang bertujuan untuk memetakan dan menghitung luncuran awan panas guguran serta memperkirakan radius aman. Dari hasil peta zona bahaya akan dibandingkan dengan peta KRB yang diumumkan tanggal 13 Desember 2021 (Gambar 3).



Gambar 4. Perbandingan panjang gelombang, frekuensi dan energi spectrum elektromagnetik (Myers, 2013)

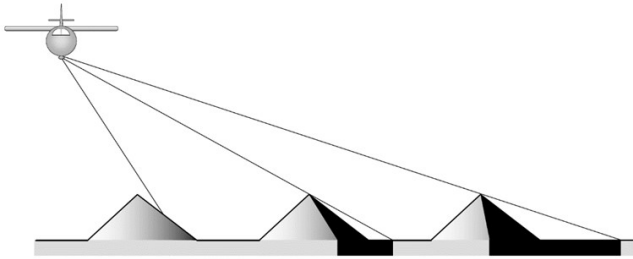
2 METODOLOGI

Perubahan medan listrik dan medan magnet membawa energi yang disebut energi elektromagnetik. Energi tersebut dibedakan berdasarkan panjang gelombang gelombang (λ) dan frekuensinya (f) sehingga dapat menentukan cepat rambat gelombang elektromagnetik (v):

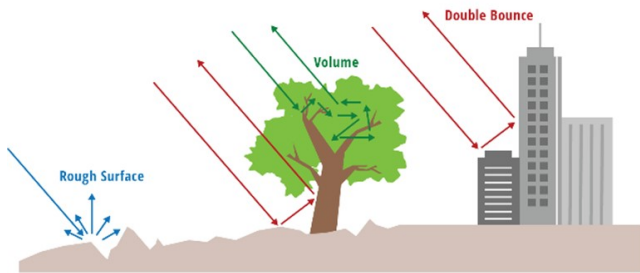
$$v = \lambda \cdot f \tag{1}$$

Gelombang elektromagnetik yang digunakan pada penelitian ini merupakan gelombang mikro dengan panjang gelombang 1 mm hingga 1 m. Panjang Gelombang mikro menurut spektrum gelombang elektromagnetik merupakan panjang gelombang paling panjang seperti pada Gambar 4. Gelombang mikro digunakan pada penelitian ini karena panjang gelombang panjang dan dengan frekuensi tertentu dapat mereduksi gangguan atmosfer seperti awan, kabut, asap, bahkan mampu menembus lapisan permukaan (Syam, 2015). Semakin besar panjang gelombangnya maka akan semakin dalam sinyal tersebut dapat menembus permukaan, namun resolusi yang dihasilkan akan semakin buruk karena kekuatan frekuensi yang digunakan semakin kecil (Beal, 1979).

Gelombang mikro untuk pemetaan cepat menggunakan satelit radar berupa Synthetic Aperture Radar (SAR). Resolusi citra pada metode SAR dipengaruhi oleh panjang antenanya (L). SAR menggunakan antenna sintesis (antena



Gambar 5. Distorsi Geometrik; *layover* (kiri), *foreshortening* (tengah), *shadow* (kanan) (Simonett, 1970)



Gambar 6. Jenis objek yang mempengaruhi kecerahan citra (Beal, 1979)

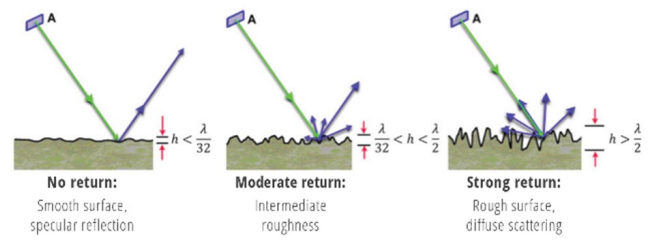
bergerak). Panjangnya antena dapat dihitung dengan:

$$L_{SA} = \frac{\lambda}{L} R_0 \approx \beta R_0 \tag{2}$$

selama satelit radar memancarkan gelombang (β) dan mengenai objek pada jarak tertentu dari satelit (R_0) secara terus menerus, jarak yang tempuh satelit yang menciptakan panjangnya antena sintesis (L_{SA}) (Beal, 1979). Hasil citra bergantung pada besarnya nilai hamburan balik sehingga akan mempengaruhi tingkat kecerahan data citra (Syam, 2015). Besarnya nilai hamburan balik bergantung pada parameter SAR (panjang gelombang, sudut pandang, dan polarisasi) dan sifat objek di permukaan (kekasaran dan sifat dielektrik). Citra diambil dengan melakukan teknik perekaman *side looking*. Perekaman *side looking* dapat menimbulkan distorsi geometri seperti *layover*, *foreshortening*, dan *shadow*. *Layover* dan *foreshortening* dapat dikurangi dengan meningkatkan sudut pandang (*look angle*) sistem SAR, namun hal tersebut dapat memperluas *shadow*.

Kecerahan data citra bergantung pada polarisasi dan objek dipermukaan seperti pada Gambar 6. Saat sensor memancarkan gelombang, gelombang dapat terpolarisasi secara horizontal (H) maupun vertikal (V). Gelombang yang mengenai objek tidak beraturan seperti daun lebih sensitif terhadap polarisasi HV atau VH. Gelombang yang mengenai objek vertikal seperti bangunan lebih sensitif terhadap polarisasi HH. Saat gelombang mengenai permukaan tanah langsung lebih sensitive terhadap polarisasi VV (Beal, 1979).

Gelombang yang mengenai permukaan kasar menghasilkan nilai hamburan balik lebih besar dibandingkan dengan permukaan yang halus. Semakin besar nilai hamburan balik, data citra akan semakin cerah (Beal, 1979). Hal ini disebabkan permukaan kasar akan dihamburkan gelombang secara acak sehingga peluang hamburan diterima sensor lebih besar (Gambar 7).



Gambar 7. Kekasaran permukaan terhadap backscatter (modifikasi dari Beal (1979)).

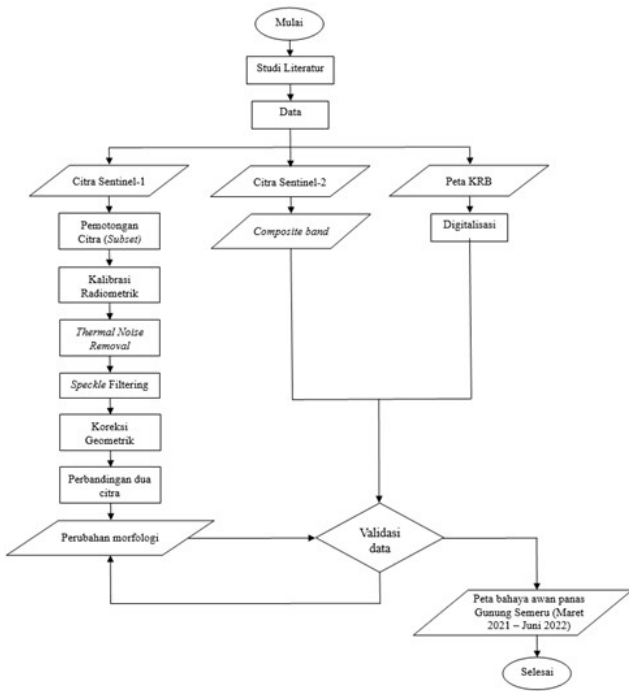
Pada penelitian ini satelit radar yang digunakan adalah satelit radar Sentinel-1 dengan mode IW tipe *Ground Range Detected* (GRD). Data penelitian didapat melalui website ESA Copernicus Open Access Hub. Penelitian menggunakan data citra dari bulan Juni hingga Desember 2021. Data citra Sentinel-1 diolah dengan software SNAP dan dilakukan subset untuk mengurangi beban pemrosesan. Selanjutnya dilakukan reduksi noise dengan kalibrasi radiometrik, *thermal noise removal* dan *speckle filter*. Data selanjutnya dikoreksi geometri dengan DEM SRTM 1Sec HTG untuk merepresentasikan topografi sebenarnya. Citra Sentinel-1 kemudian dibandingkan antara dua data dengan waktu yang berbeda menggunakan software ArcGIS. Perbandingan tersebut untuk melihat intensitas hamburan balik agar dapat dianalisis perubahan morfologi Gunung Semeru.

Satelit radar kemudian dibandingkan dengan satelit optik. Satelit optik yang digunakan adalah satelit Sentinel-2. Satelit Sentinel-2 merupakan satelit *Multispectral Imager* (MSI) yang memiliki 13 band spektral. Band spektral dapat dikombinasikan untuk mendapatkan informasi lebih rinci. Informasi termal pada gunung api diketahui dengan mengkombinasikan band 12, 8a, 4 menjadi *shortwave infrared*. Kombinasi tersebut menghasilkan warna merah untuk menunjukkan area terbakar, warna hijau untuk menunjukkan vegetasi, warna cokelat untuk menunjukkan tanah dan warna putih menunjukkan awan. Satelit Sentinel-2 dipilih berdasarkan citra yang bersih dari awan. Pada bulan Juni hingga Desember 2021, menggunakan 2 data citra Sentinel-2. Analisis citra Sentinel-1 yang sesuai dengan citra Sentinel-2 kemudian didelineasi sebagai dasar koreksi Peta Kawasan Rawan Bencana (KRB) 1996 dan 2021, sehingga didapat jarak luncuran awan panas dan luasan area terdampak awan panas. Bagan Penelitian dapat dilihat pada Gambar 8.

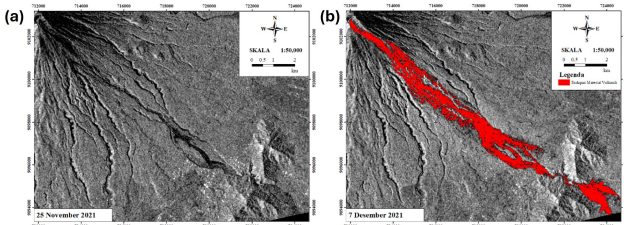
2.1 Hasil dan Diskusi

2.1.1 Pemantauan Aktivitas dengan Menggunakan Citra Sentinel-1

Hasil pengamatan citra Sentinel-1 menunjukkan perubahan morfologi cukup signifikan setelah erupsi 4 Desember 2021. Perubahan morfologi dapat dilihat melalui citra Sentinel-1 sebelum terjadinya erupsi (25 November 2021) dimana kubah lava berkembang dan setelah terjadinya erupsi (7 Desember 2021) dimana kubah lava longsor (Gambar 9). Jika dilihat rona citranya, terjadi perubahan dari puncak hingga ke tenggara menjadi lebih gelap. Citra yang memiliki rona lebih gelap mengindikasikan bahwa citra tersebut memiliki nilai hamburan balik mendekati nol. Nilai hamburan yang kecil menggambarkan permukaan material ha-



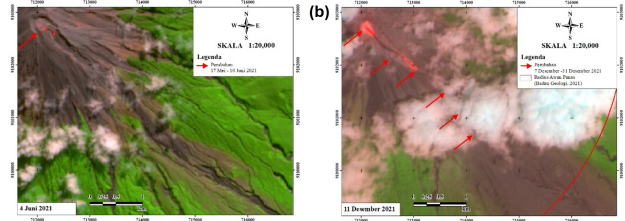
Gambar 8. Diagram alir penelitian



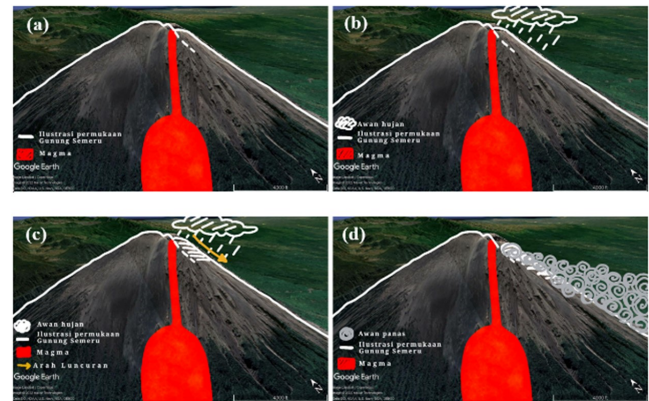
Gambar 9. Perbandingan citra Sentinel-1 (a) sebelum dan (b) setelah erupsi

lus sehingga akan terjadi pemantulan teratur. Gelombang hamburan balik terpantulkan dengan besar sudut pantul hampir sama dengan besar sudut datang gelombang. Nilai hamburan kecil juga dapat disebabkan karena efek *shadow* disebabkan karena erupsi 4 Desember 2021 menghasilkan cekungan cukup dalam, sehingga gelombang radar terhalang objek tinggi.

Pada tanggal 4 Juni 2021 jejak termal terlihat melalui citra optik (Sentinel-2). adanya jejak termal pada puncak gunung semeru mengindikasikan adanya endapan aliran lava. endapan aliran lava terus membentuk kubah dan lidah lava. pada tanggal 4 Desember 2021 kubah dan lidah lava gugur akibat erupsi. Perbedaan morfologi terlihat melalui citra optik ditunjukkan oleh Gambar 10. Cekungan hasil erupsi terlihat lebih dalam dibandingkan citra sebelumnya. Secara teori daerah vegetasi berwarna hijau setelah terjadi erupsi 4 Desember 2021, daerah vegetasi menjadi berwarna coklat akibat endapan erupsi.



Gambar 10. Perbandingan citra Sentinel-2. (a) Sebelum erupsi, (b) setelah erupsi.



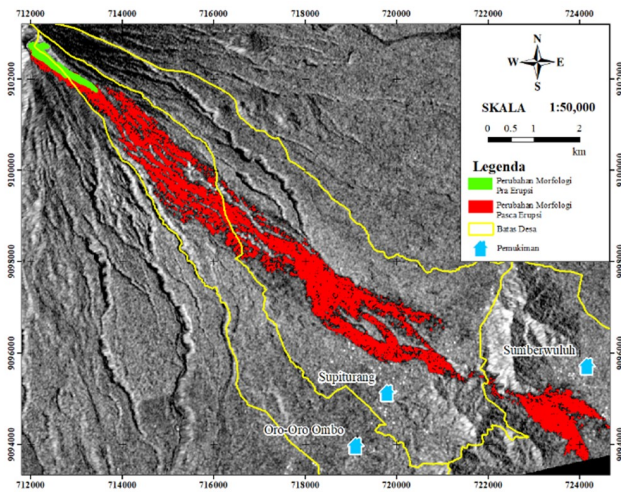
Gambar 11. Model konsep perubahan morfologi puncak Gunung Semeru: (a) perkembangan kubah lava, (b) hujan dengan intensitas tinggi, (c) kubah lava tidak stabil, (d) terjadi awan panas guguran

2.1.2 Perubahan Morfologi Puncak Gunung Semeru

Kondisi morfologi puncak Gunung Semeru mengalami perubahan morfologi sangat signifikan sejak bulan Juni 2021 yang ditandai dengan anomali thermal (Gambar 11). Perubahan morfologi disebabkan oleh berbagai aspek berupa perkembangan kubah lava, guguran, aliran lava, serta awan panas guguran. Perubahan morfologi cukup signifikan terjadi setelah erupsi 4 Desember 2021 dimana material pada puncak gugur dan menghasilkan awan panas dengan jarak luncur melebihi zona KRB. Runtuhnya kubah lava pada Gunung Semeru dapat disebabkan oleh hujan yang tinggi. Hujan akan masuk ke dalam tubuh gunung api melalui retakan – retakan di kubah lava dan mengakibatkan tekanan gas berlebih yang dapat memicu ketidakstabilan kubah lava (Elsworth dkk., 2004; Darmawan dkk., 2018). Kubah lava mengalami longsor dan membentuk awan panas guguran pada pukul 14.50 WIB. Aktivitas getaran banjir akibat hujan deras terekam seismograf pada stasiun pengamatan Gunung Semeru.

2.1.3 Pemetaan Daerah Bahaya Awan Panas

Berdasarkan hasil pengolahan dan interpretasi data citra satelit Sentinel-1 didapatkan persebaran awan panas dari bulan Juni – Desember 2021 seperti pada Gambar 12. Material vulkanik Gunung Semeru seperti guguran, awan panas guguran, dan aliran lava mayoritas keluar mengarah ke tenggara menuju ke Besuk Kobokan, Desa Supiturang, Kecamatan Pronojiwo. Dari hasil analisis data citra Sentinel-1 didapat-



Gambar 12. Peta perubahan pra dan pasca erupsi Gunung Semeru bulan Juni – Desember 2021. Persebaran awan panas ditandai dengan warna merah.

an luncuran awan panas mencapai 15,2 km dengan luas area terdampak kurang lebih 5,5 km². Erupsi pada tanggal 4 Desember 2021 juga berdampak pada desa di kaki Gunung Semeru. Desa berpotensi terdampak awan panas adalah Desa Sumberwuluh, Desa Oro Oro Ombo dan Desa Supiturang.

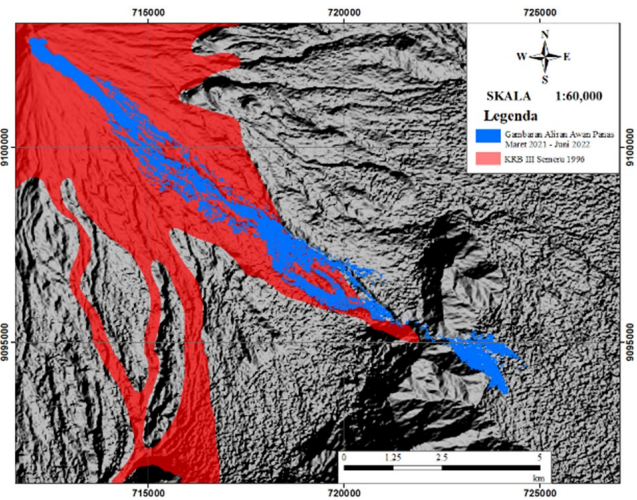
2.1.4 Validasi Peta

Hasil deliniasi perubahan morfologi dan awan panas guguran data citra satelit Sentinel-1 dilakukan validasi dengan menggunakan peta Kawasan Rawan Bencana (KRB) dan didapatkan perbandingan seperti pada Gambar 13 untuk peta KRB 1996 dan Gambar 14 untuk peta KRB 2021. Badan Geologi menetapkan zona kawasan rawan bencana III kurang lebih 12 km ke arah tenggara, namun dari hasil deliniasi citra Sentinel-1 menghasilkan luncuran awan panas melebihi zona KRB III tahun 1996. Hasil deliniasi juga dibandingkan dengan peta KRB 2021. Jarak awan panas guguran hasil deliniasi termasuk dalam zona KRB III dengan radius kurang lebih 16 km dari puncak. Peta KRB 2021 hanya menampilkan zona bahaya di sektor tenggara, sehingga zona KRB III dimulai pada jarak kurang lebih 8 km dari puncak Gunung Semeru.

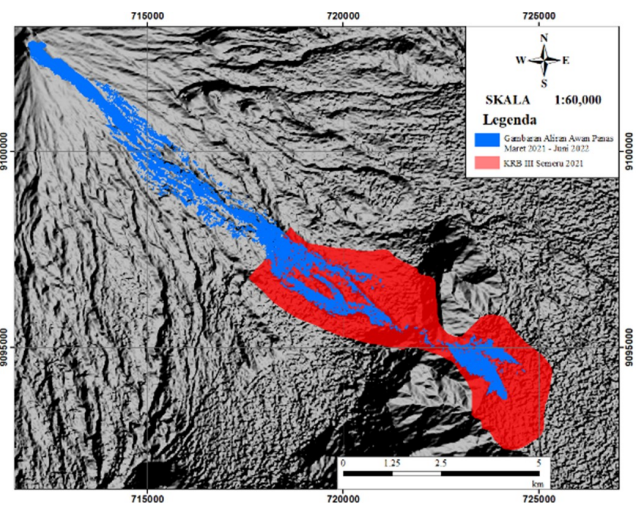
3 KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian pemetaan awan panas Gunung Semeru bulan Juni hingga Desember 2021 didapatkan kesimpulan yaitu:

- (i) Jarak luncur maksimum awan panas guguran mencapai 15,2 km akibat adanya curah hujan yang tinggi sehingga menyebabkan perubahan morfologi pada Gunung Semeru.
- (ii) Berdasarkan data satelit Juni – Desember 2021 dihasilkan peta zona bahaya awan panas Gunung Semeru. Luas area terdampak kurang lebih 5,5 km² diantaranya Desa Supiturang, Oro-Oro Ombo dan Desa Sumberwuluh.
- (iii) Jarak luncur awan panas hasil pemantauan sentinel-1 melebihi zona KRB III tahun 1996 dan sesuai dengan zona



Gambar 13. Validasi dengan peta KRB III tahun 1996 yang diberi warna merah dan gambaran awan panas ditandai dengan warna biru



Gambar 14. Validasi dengan peta KRB III tahun 2021 yang diberi warna merah dan gambaran awan panas ditandai dengan warna biru

KRB III tahun 2021 dengan radius kurang lebih 16 km ke arah tenggara

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini didanai oleh hibah dana masyarakat Fakultas MIPA UGM 2022. Terima kasih kepada Dr.rer.nat Ade Anggraini, M.Si. dan Dr.rer.nat. Sintia Windhi N., M.Eng. yang telah memberikan masukan dalam perbaikan karya tulis ini.

Pustaka

BadanGeologi (2014): Gunung semeru, jawa timur.
 BadanGeologi (2021): Magma indonesia. kementerian energi dan sumber daya mineral.

- Beal, R.C. (1979): Useful spaceborne synthetic aperture radars. In: NAPOLITANO, L. (Ed.) *Astronautics for Peace and Human Progress*. Pergamon, ISBN 978-0-08-024732-8, 263–275, doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-024732-8.50026-X>.
- BNPB (2020): Posko semeru memberikan bantuan sektor pendidikan.
- Darmawan, H., Walter, T.R., Troll, V.R. and Budi-Santoso, A. (2018): Structural weakening of the merapi dome identified by drone photogrammetry after the 2010 eruption. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, **18**(12), 3267–3281, doi:[10.5194/nhess-18-3267-2018](https://doi.org/10.5194/nhess-18-3267-2018).
- DeMets, C., Gordon, R.G., Argus, D.F. and Stein, S. (1990): Current plate motions. *Geophysical Journal International*, **101**(2), 425–478, ISSN 0956-540X, doi:[10.1111/j.1365-246X.1990.tb06579.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1990.tb06579.x).
- Elsworth, D., Voight, B., Thompson, G. and Young, S. (2004): Thermal-hydrologic mechanism for rainfall-triggered collapse of lava domes. *Geology*, **32**(11), 969–972, ISSN 0091-7613, doi:[10.1130/G20730.1](https://doi.org/10.1130/G20730.1).
- Handley, H.K., Macpherson, C.G., Davidson, J.P., Berlo, K. and Lowry, D. (2007): Constraining Fluid and Sediment Contributions to Subduction-Related Magmatism in Indonesia: Ijen Volcanic Complex. *Journal of Petrology*, **48**(6), 1155–1183, ISSN 0022-3530, doi:[10.1093/petrology/egm013](https://doi.org/10.1093/petrology/egm013).
- Myers, J. (2013): The electromagnetic spectrum.
- Simonett, D.S. (1970): Remote sensing with imaging radar: a review. *Geoforum*, **1**(2), 61–74, ISSN 0016-7185, doi:[https://doi.org/10.1016/0016-7185\(70\)90029-1](https://doi.org/10.1016/0016-7185(70)90029-1).
- Syam, P.D.R. (2015): GAMMA-NAUGHT RADIOMETRIC CALIBRATION OF ALOS PHASED ARRAY L-BAND SYNTHETIC APERTURE RADAR JAVA MO-SAIC.
- Walter, T.R. dkk. (2019): Imaging the 2013 explosive crater excavation and new dome formation at volcán de colima with terrasar-x, time-lapse cameras and modelling. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **369**, 224–237, ISSN 0377-0273, doi:<https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2018.11.016>.
- Walter, T. dkk. (2015): Volcano-tectonic control of merapi's lava dome splitting: The november 2013 fracture observed from high resolution terrasar-x data. *Tectonophysics*, **639**, 23–33, ISSN 0040-1951, doi:<https://doi.org/10.1016/j.tecto.2014.11.007>.